

エネルギーとエントロピーと環境問題

白鳥紀一

1 はじめに

エントロピーという概念は、かつて海軍兵学校で判らないことの代名詞に使われたという話¹もあって、理解しにくいという定評がある。それにはいくつかの原因があると思われる。一般的に、具体的な状況にいろいろ適用する事なしには抽象的な概念の理解は難しい。また、元々巨視的な概念なので、ミクロな状態を用いるボルツマンの表現は（物理屋が利用するのには必須であっても）必ずしも概念を理解する助けにならない。ここでは、状態変化の不可逆性の定量化、という観点から議論をして、変化の速度を考慮に入れる試みや情報量との関係を述べ、資源環境問題を論じる際の1つの視点を提示したい。なお、この議論は既に

- 1) 白鳥紀一・中山正敏: 「環境理解のための熱物理学」、朝倉書店、1995年、
- 2) エントロピー学会編: 「循環型社会」を問う」、藤原書店、2001年、
- 3) 白鳥紀一編: 「物理・化学から見た環境問題」、藤原書店、2003年、

などで述べた事の再論で、新しいものではない。また厳密な議論は上記1)に譲る。このレジュメも前半は内容表現とも硬いけれども、お許しを頂きたい。論理的に確かな議論であることを理解していただければ、直接4節まで跳んで下さって結構である。

2 不可逆性の定量化

2.1 状態変化の時の保存量と変化の方向（熱力学第二法則）

物質とかエネルギーとかいう概念について説明する必要はないだろう。また、その外側と区別できるまとまりを持っている部分（これを物理屋は「系」と呼ぶ）も考えるのが容易だろう。たとえば、一人の人間がそうだ。系の中で、外界と物質もエネルギーもやりとりしないものを「孤立系」と呼ぶ。孤立系の物質とエネルギー量は変化しない。これが熱力学の第一法則で、これも自明と考えて良からう。2つの系の間で物質やエネルギーの移動があれば、一方の系で減った分だけ他方の系では増えていて、2つの系を合わせて考えれば変化がない。

系の物質とエネルギー量が一定でも、系の状態は変わりうる。状態の変化には方向がある、と主張するのが熱力学第二法則である。その変化の方向は物質やエネルギーの量では決まらない。これらの量は変化の前と後とで等しいのだから。変化の方向を（その大きさとともに）決めるのがエントロピーである。

孤立系を十分長く保持すると、変化が一方向で起こるので、最後にはある決まった状態に落ち着く、と考えるのは自然である。これが熱平衡状態で、たとえば気体ならば体積・圧力・温度が決まっている。これらの量が違えば、違う状態である。それぞれの状態について決まっている量を状態量というが、逆に状態量を指定すれば状態が決まる。しかし熱平衡状態では、全ての状態量を勝手に指定することは出来ない。状態量の間には一定の関係式が成り立っている。それを状態方程式という²。

さて、熱力学第二法則は、たとえば次のように表現される。

トムソンの原理: 一つの熱源から熱を受け取り、それと等量の仕事を外にするだけで、それ以外に変化を残さない過程は実現できない。

クラウジウスの原理: 低温の熱源から高温の熱源に熱を移すだけで、それ以外に変化を残さない過程は実現できない。

これらは定性的な不可逆性の表現だが、重要なのは「それ以外に変化を残さない」という限定であって、その過程を実現した時に残る変化量を同定できれば、不可逆性を定量出来る。それがエントロピーであって、以下に述べるようにその部分の変化を元に戻すために必要な最小仕事量と関係している。

¹勝木渥氏によれば、それは清閑寺健の『江田島』によって世に広まったようである。

²後で述べるように、われわれが生きていられるのは環境が熱平衡状態にないからである。しかし熱平衡でない状態も、熱平衡状態についての理解を基盤にしなければ理解できない

2.2 状態を元に戻すのに必要な最小仕事

$$pV = nRT \quad (1)$$

という状態方程式に従う理想気体を考える。ここで n は気体の量 (モル数) である。温度 (T_1 とする) が等しく、圧力 p と体積 V の違う二つの状態を考えよう。体積をそれぞれ V_{A1}, V_{B1} , ($V_{A1} < V_{B1}$) とする。状態 A1 から状態 B1 への変化は自然に起こるが、逆変化は自然には起きない、というのも自明だろう。風船に穴を開けると中の気体は漏れ出すが、逆は起きない。これも不可逆変化の一例である。

状態 B1 を状態 A1 に戻すには、たとえば、気体をゆっくりと (温度が変わらないように) 圧縮すればよい。「ゆっくり」というのは仕事を最小にするための条件で、物理屋は「準静的」と表現する。この条件のおかげで、いつも式 (1) が使える。圧縮の際気体に対して外部 (環境) がする仕事量は、式 (1) が使えれば、

$$W = \int_{V_{B1}}^{V_{A1}} p(-dV) = -nRT_1 \int_{V_{B1}}^{V_{A1}} dV/V = nRT_1 \log(V_{B1}/V_{A1}) \quad (2)$$

と書ける。符号に注意。

上の過程で気体の温度は一定だから、外から気体にした仕事 W が気体の周囲 (環境) に熱エネルギーとして移動していることを注意しておく。この逆過程 (仕事をさせながら気体をゆっくりと膨張させる) では、周囲の熱エネルギーが力学的エネルギーになる。だから、上の等温圧縮自体は可逆過程である。しかし、外部 (環境) では仕事分の力学的エネルギーがなくなって、熱として周囲 (環境) に存在する、という変化が残っている。上記、トムソンやクラウジウスの表現を参照。

2.3 可逆な温度変化を用いた不可逆変化量の一般化: エントロピー

上で、状態 A1 の気体が仕事をしないで膨張して状態 B1 になるのは不可逆過程だ、と述べた。その不可逆性の度合は、状態 B1 を状態 A1 に戻すための仕事量 (式 (2)) W で表せるが、それは一般的ではない。温度 T_1 を含んでいるからである。変化の不可逆性の指標としては、 W を T_1 で割った

$$\Delta S_{A1 \rightarrow B1} = W/T_1 = nR \log(V_{B1}/V_{A1}) \quad (3)$$

が妥当である。こうすると、温度が変わっても変化の経路によらず、最初と最後の状態だけで指標が決まることが次のように示される。

状態 A1, B1 の温度を、 T_1 と異なる T_2 にする。そのために、気体の断熱圧縮 (あるいは仕事をさせながらの断熱膨張) を用いる。空気バネを考えれば判るように、この過程は力学的で可逆である。この過程では、次式が成り立つ。

$$V_2/V_1 = (T_2/T_1)^\beta, \quad \beta = C_v/nR \quad (4)$$

ここで C_v は、体積一定という条件下の比熱である。

関係式 (4) によれば $V_{A2}/V_{A1} = V_{B2}/V_{B1}$ であり、従って $V_{B1}/V_{A1} = V_{B2}/V_{A2}$ であって、式 (3) で定義した ΔS は状態変化 $A1 \rightarrow B1$ でも $A2 \rightarrow B2$ でも等しい。つまり、 $A1 \rightarrow B1 \rightarrow B2$ という変化も $A1 \rightarrow A2 \rightarrow B2$ という変化も ΔS に等しい値を与え、状態 A1 から B2 への変化による不可逆性の量的指標が変化の経路によらずに与えられたことになる。これを図 1 に示した。

式 (3) が状態変化によるエントロピー変化である。等温圧縮・膨張について式 (2) の下で述べたことを参照すれば、可逆変化では $\Delta S = 0$ であることを考慮に入れて、温度 T の系に熱エネルギー $Q (= W)$ が導入された時のエントロピー増加は

$$\Delta S = Q/T \quad (5)$$

で与えられる事が判る。これはまた、存在範囲の縮小 (濃縮) はエントロピーの減少であり、その減少が力学的エネルギーの熱化によるエントロピーの増加を代償として、実現出来ることを示している。

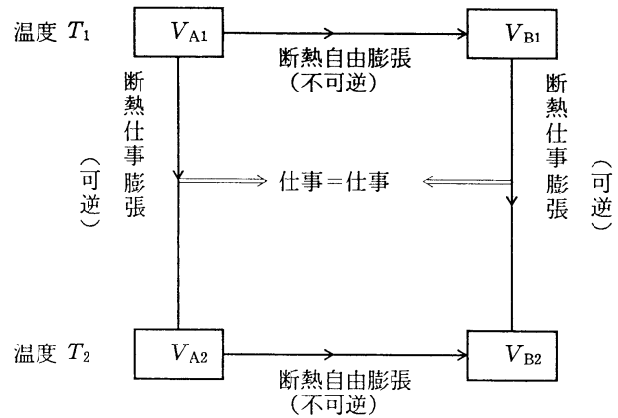


図 1 温度の違う二つの状態を違う経路で結ぶ

このように環境と相互作用があつて等温とか等圧とかいう条件の付いている系で、系+環境の全エントロピーが最大という平衡条件を系だけで表現すると、自由エネルギー最小となる。高橋秀俊先生が紹介し、押田勇雄氏が普及に熱心だったエクセルギーも同様に解釈できる。

2.4 エルゴードの定理: マクロな状態のミクロな定義/情報の問題

ここまで温度とか体積とかいうマクロな指標だけを使って議論してきた。しかしわれわれは既に、物質が原子からなっていることを知っている。エントロピーというマクロな指標のミクロな状態による表現は、ボルツマンの有名な式

$$S = k_B \log W \tag{6}$$

で与えられている (この W は仕事ではなくて、状態の数である)。この式は、式 (3) と違って、2つの (マクロな) 状態の差ではなくある状態に固定した値を与えている。従つて、原点を指定しなければならない。それが熱力学第3法則で、絶対0度では $S = 0$ 、即ちエネルギー極小の唯一の状態が実現している。

問題は、式 (6) の W である。また気体を考えることにして、気体のあるミクロな状態は構成する各分子の位置と運動量で決まる。しかしそれは、そのままでは、マクロな状態を与えない。各分子の位置は運動量に応じて変わり、運動量は衝突で変わる。ミクロな状態は、外部とは関係なく系内の事情で、時々刻々変化する。その変化する範囲を決めるのが体積 (位置の範囲)・温度 (全エネルギー) などのマクロな状態量である。系内部の相互作用によってミクロな状態が可能な範囲をまんべんなく遍歴する事は、エルゴードの定理によって保証される。その可能な範囲は、ガラス状態のように、外部から決めることが出来ない事もあるので注意が必要だが、今はそれは措く。ミクロな状態とマクロな状態は概念として違う。

ミクロな状態とマクロな状態を峻別することは、情報量と関係して重要である。シャノン以来、情報量はエントロピーと関連づけて議論されることが多い。計算機がエネルギーを消費するのは計算過程で情報が捨てられるからだとか、情報を駆使すれば熱力学第2法則の制約を突破できるとかという主張すらある。それは全く誤りである。情報は、外 (たとえば人間) で決められる。情報が外からの作用でなく情報 (群) 内部の相互作用でくると変化してしまうなら、それは情報ではない。情報は統計力学でいうミクロな状態ではなくて、マクロな状態である。ミクロな状態とマクロな状態を等置する事は出来ない。エントロピーと情報量の数学的な構造が一致するからといって、それらを足したり引いたり出来ないのは当然である。

3 効率と能率: 速度の問題

さて、上のエントロピーの定義で「元に戻すための最小仕事」といった。また状態を変える時に、「ゆっくりと圧縮する」といった。それはたとえば、熱の移動を考えればはっきりする。単位時間あたり移動する熱量 q は通常温度差に比例する。熱抵抗を r 、時間経過を t と書いて

$$q = \Delta T / r, \quad Q = t \cdot \Delta T / r. \tag{7}$$

温度差がないと熱は移動しないが、高温から低温に熱が移動すると式 (5) によってエントロピーが増える。それでカルノーは、極限として、熱源と作業気体の間の温度差のない (すなわち「準静的」な) 熱の移動を考えた。そうすると熱の移動には無限大の時間がかかるので、カルノー機関は能率 (単位時間あたりの仕事) が 0 になる。しかし元来われわれは、時間あたり仕事を沢山するために (熱) 機関を使うのだ。

この点を含めて、熱機関についてのもう少し実態に近い議論は、特にオイル・ショック以来努力されてきた。その中で、熱学の中で得られたきれいな結果として、F. L. Curzon & B. Ahlborn (American Journal of Physics, 43 (1975) 22.) を引用しておく。これはカルノー機関を考え、図2の様に熱源・熱溜と機関の間に熱抵抗を導入する。

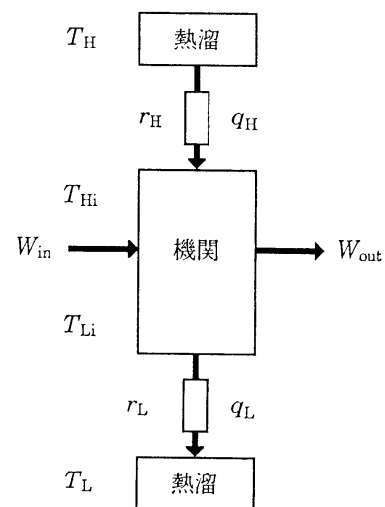


図2 熱抵抗のある熱源

能率最大という条件を付けると、効率として

$$\eta = w/q_H = 1 - \sqrt{T_L/T_H} \tag{8}$$

が簡単な計算で得られる。ここで T_H, T_L はそれぞれ高温・低温の熱源・熱溜の温度、 q_H は高温の熱源から供給される単位時間あたりの熱量、 w は単位時間あたりの仕事（能率）である。たとえば通常の軽水炉を考えれば、高温の熱源温度は水の三重点で制限されて約 300°C で、低温の熱溜の温度を 300 K とすればカルノー効率は約 50% になる。式 (8) は約 30% の効率を与え、ずっと実際に近い。その他、シリンダーの圧縮比や高温の熱源からの熱漏れなどを考慮に入れた少し現実的な考察が文献 1) にある。

能率を上げようとするとき効率が下がるという事情は、物質の分離の際も同様に発生する。それは、半透膜を用いた分離を考えれば理解できよう。単位時間あたりの分離量を上げようとするとき、圧力をかけて溶液を動かさなければならない。そうすると水の流れに対する抵抗によって損失が生じる。

物質の分離・混合（抽出・精製）はわれわれが生きて行くために非常に重要な過程だが、ここで詳しく述べる時間がない。上記文献 1) の第 5 章、あるいは下記文献 4) の第 6 章を参照されたい。ただここで、エントロピーの示す最小仕事はエネルギーの移動に関わる熱機関の効率に対してはかなり良い近似を与えるのに対して、物質の移動に関わる分離では全くそうではないことを注意しておく。上で原子力発電の効率を述べたが、カルノー効率もオーダーは違わない。ニューコメンの機関も、熱効率は 1% 程度だったろうという推定がある。それに対して物質の分離では、極端な場合軽水炉用のウラン濃縮の際の効率は、エントロピー差によって求められる理想効率の 10^{-8} 程度という推定がある。これでは、この大きさの推定には全く役に立たない。

4) 中山正敏: 「環境システムとエントロピー（物質環境科学）」、放送大学教育振興会、2003 年。

4 開かれた能動定常系の持続存在条件と環境問題

熱物理学から環境問題を考える時、基本的な概念は能動定常系、つまりいろいろ活動しながらほぼ定常な状態を保っている系である。それはいろいろなレベルで存在する。たとえば、細胞・個体・種・生態系・局所環境・地球はそれぞれ能動定常系である。また熱機関も、仕事をするという意味で能動系に含めることができる。活動に伴って必ずエントロピーが増加することを考えれば、定常であるためには増加したエントロピーを系外に捨てなければならないことは自明である。エントロピーはエネルギーまたは物質に付随してでなければ移動できないから、エネルギーまたは物質の補充が必要になる。それが資源である。廃棄や補充は環境との間で行われる。それが可能な状況をどう維持するかが、現在の環境問題である。

能動定常系は、それを構成する構造と、そこを通り抜ける物質やエネルギー（フロー）がなければ成立しない。さらに、活動を制御する情報の生成と適切な処理が必要である。能動定常系の中で生物は、自分の構造の修理と自分のコピーを作る点で、特徴を持っている。生物個体内の物質・エネルギー、エントロピー、情報の流れの模式図を図 3 に示す。以下、もう少し立ち入って考えよう。

4.1 フローについて

元々熱力学は熱機関を通り抜けるエネルギーのフローの考察から出発したので、これは一番熱力学で扱いやすい部分である。能動定常系には高温のエネルギー源と低温の熱溜と 2 種類の環境が必要であり、その環境が定常でなければ中の系は定常であり得ない。環境が定常であるためには環境の環境が必要であって、上で述べたような階層構造は必然である。最終的に、地球上の能動定常系のエネルギー源は太陽光であり、

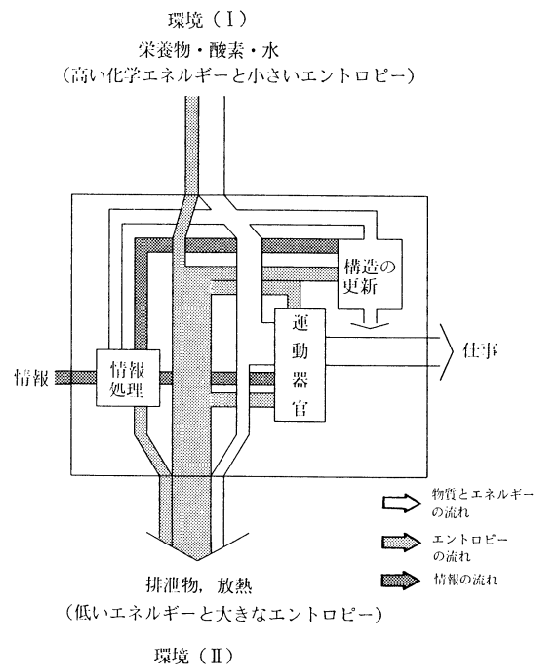


図 3 動物の活動

熱溜は低温の宇宙空間である。そのエネルギーの流れの中で、地球は外部との物質のやりとりが無視できる閉鎖系だから、地球が定常系であるためには内部での物質の循環が必須である。また太陽から宇宙空間へのエネルギーの流れとの関係で、物質の流れがあまりに大規模になると地球環境は損なわれる。

物質循環は、一つの系では実現できない。たとえば、自分の尿を飲むのは循環ではない。尿は最初に飲んだ水とは違うからである。同じ質の水が供給されなければ循環ではないが、そのためには尿を利用して生きる別の系が存在して尿を分解する過程が必要である。生物は、他の生物と一緒になければ生きられない。最終的には、水分が蒸発して上空に上がり、凝縮して雨として降ってくる過程で水の循環が保証されるが、それは地表の温度の高度分布が適当であること、地球の重力が水分子を捕まえて離さない程度に強いこと、大気分子に比べて水分子の質量が小さいこと、など状況が偶然的に整っている事に由来する。古来人類にとって水が最も重要な資源だったのは、物質の循環過程を地球からの熱放射に結びつける要として機能するからである。水はエントロピー廃棄の為に最も重要で、勝木渥の「低エネルギー低エントロピー資源」の命名にふさわしい。酸性雨を考えれば判るように、水循環を損なう条件は多い。

地球上の生物にとってエネルギーの流れは、植物の光合成を起源とする物質に担われている。資源環境問題としては、その存在形態が問題になる。廃棄物の環境負荷をその廃棄物の持っているエクセルギーで評価しよう、という試みがあった。廃棄物がエクセルギーを持っていれば、それは周囲に働きかける能力（環境を破壊する能力）を持っている、と考えることが出来る。しかし、廃棄物のエクセルギーはまた、他の系がそれを利用して生きる可能性を示している。問題は多くの系が良い関係を持って働いているかどうかによって、物質の持っているエクセルギーだけでの評価はあまり適当でないようである。

4.2 構造について

能動定常系の構造の問題は、フローよりは熱学の枠に入りにくい。カルノー以来、熱機関を構成するピストンやシリンダーの摩耗は、機械学の問題ではあっても熱学の対象ではなかった。かつてジョージエスクレーゲンは、構造が必ず摩耗することを熱力学の法則（第四法則）として、それを考察の基礎に置こう、と提案したことがある。しかし、その提案はあまりきちんと受け取られなかった。それは、構造の機能が損なわれているかどうかというのは材質の問題ではないので、物理学の概念としての扱い方が分明でない事が一つの原因だったと思われる。全体としては摩耗せずしっかりしていても、どこかに孔があればその構造全体が使えなくなる。それは、熱平衡といった概念とは全く無縁である。

ごみ問題としては、廃棄された構造物が大きな部分を占める。もともと構造物は、フローと違って、形態があまり変化しないことが前提である。だから、もちろんケースバイケースではあるけれども、分解されて物質循環に乗ってまた再び利用できる形になるのに時間と手間がかかる。リサイクルよりもリユースが推奨される所以である。

地球上の能動定常系の構造が固体で形成されることは、自明であるけれども確認しておく必要がある。固体の凝集エネルギーが熱源のエネルギー密度を制限するからである。核エネルギーは化学結合エネルギーより百万倍ほど密度が高い（エネルギーあたりのエントロピーが小さい）良質のエネルギーだ、といった議論があるが、資源問題としてはそれは全く正しくない。軽水炉は水で冷却することで構造を保持している（保持できなくなれば福島のような惨事が起こる）ので、熱源としては300°C程度に過ぎない。太陽のように巨大な質量で構造を維持すればこの条件はなくなるが、そのために質量あたりのエネルギー発生量は $2 \times 10^{-4} \text{W/kg}$ で、人間（約2 W/kg）より桁違いに小さい。ガソリン機関は1 kW/kgのオーダーで、これが地上に実現できる構造では上限のようである。製鉄用の高炉など、定常連続反応装置のエネルギー密度も 3MW/m^3 を越えないそうで、これも同程度である。これは、核融合など高密度エネルギーによるさらに大規模なエネルギー源の開発に疑問を投げているように思われる。

4.3 情報について

情報理論は情報をもつばら量的な側面から眺めるが、内容からいえば、能動系の活動を制御する物質あるいはエネルギーが情報である、ということが出来る。活動のためのエネルギーは、それを制御する情報ではなく、系から別に供給される。そのために、情報それ自体のエネルギーは小さくとも、従って検出が難しいのに、大きな結果をもたらさう。それが本来の系統以外からも供給可能であるために、予想外に大きな環境問題を引き起こすことがある。既に、サリドマイドなどの薬害でその例は明らかである。環境ホルモ

ンの問題、あるいは非電離性放射線の健康効果（配電線近傍の癌発生など）などは情報の問題であろうが、能動定常系の情報の形態がきわめて多様でありまた大量であるために、一般的な対策は難しく、疑われる場合毎に疫学的な調査を徹底するしかさしあたりの対策はないように思われる。

5 環境問題における科学と反科学

前節では、エントロピーという物理学で導入された概念を用いて環境問題を議論した。しかし、それでは、環境問題は科学の枠内で解決されると期待できるだろうか。私はそれに否定的だが、その前に、前節で述べたことが「科学」といえるかどうか、疑問とする。ここで述べたような、エントロピーをキーとした議論を大雑把にエントロピー論というすれば、既に1986年に吉岡斉がその点を取り上げて、地球から宇宙空間へのエントロピー廃棄に関連して批判している。それに応じた赤澤五郎の議論も参照されたい。

5) 吉岡斉: 「科学史家から見たエントロピー学」、エントロピー読本、1986年、55頁、日本評論社。

6) 赤澤五郎: 「科学・反科学・エントロピー論」、エントロピー読本、1987年、31頁、日本評論社。

5.1 吉岡斉のエントロピー論批判

ここでの議論に必要な部分を要約すれば、吉岡の批判の中心はエントロピー論が単なる解釈の図式で、科学ではないし、科学と比べられるようなものではない、という点にある。

たとえば大気の熱輸送について数値的な予測が出来ない、という点は全くその通りである。一般に環境問題を考えても、エントロピーは状態を元に戻す為に必要な最小仕事を与えるという意味で環境負荷の推定に役立つはずだけれども、それは能率0の時の値で、実際に状態を元に戻そうとすると、桁違いに大きな仕事量を必要とする。また具体的な方法（たとえば、成分分離のための膜をどう作るか）に関係のない議論で、現実存在する環境問題をどう解決するか、という具体的な道筋を示さない。

ここにはエントロピーという概念の抽象性の方向が現れているのだが、それだけではない。生産過程の改良にエクセルギーが実際に有効に用いられる局面があることを考えれば、地球環境問題の性格が顔を出している。それでは科学だけで環境問題は解決できるのか、という問題である。それが不能であることはほとんど自明と思われるが、四半世紀前に宇井純が物理学会で行った講演をもう一度参照しておこう。

5.2 宇井純の科学批判

宇井純は1980年に日本物理学会で「公害に現れた科学的方法論の限界」という講演をした。その記録は、

7) 宇井純: 「公害に現れた科学的方法論の限界」、日本物理学会誌 35(12) (1980) 955.

「科学・社会・人間」99号(2007年)39頁に再録。

にある。彼はそこで水俣での経験の上に、公害という社会的現象を解明して適切な対策をたてるのに、自然科学の手法がしばしば無益であるばかりか、時に有害であることを具体的に述べた。

ここに露呈する問題は一つではない。まず、科学者を自称する連中の党派性がある。水俣でチッソを免責しようとした清浦雷作（当時東工大教授）や戸井田菊次（当時東邦大教授）の論文は、たとえば魚の水銀量の比較対象に阿賀野川（上流に昭和電工の同種工場があり、その後有機水銀中毒の発生が明らかになった）を選びしかも地名を明らかにしないなど、ほとんど科学の範疇を逸脱しているが、それを科学的に証明するには時間がかかる。その時間はまさに被害拡大の時間である。この様な「科学者」の（あるべき、あるいは本来の）科学からの逸脱は、3.11. の後も大規模に繰り返された。たとえば理系34学会の学会長の共同声明など。

しかし、科学自体に即してもっと本質的な問題がある。それは、モデルの限界の認識である。斑目原子力安全委員長はかつて、技術は見切らなければ出来ない、といったと伝えられる。それはその通りだが、その見切りが正しいという保証は必ずしもない。上で吉岡の述べた予測可能性はモデルの上にはしか成立しないが、モデルは何かを切り捨ててしか存在し得ない。その切り捨てた部分は何をもたらすか。自分の都合で限定して、自然を利用主義的に見ている限り、科学技術は事故と無縁ではあり得ないだろう。デカルト以来の科学技術がモデル（考える範囲の限定）を基礎としている事を考えれば、われわれは「科学」に安住は出来ないことになる。いうまでもないが、「科学」を捨てればよいのではない。科学に安住しないことを反科学というすれば、われわれは科学と反科学の双方を往復しなければならない。